مدیریت صنعتی
Journal of Industrial Management
دانشکدهٔ مدیریت دانشگاه تهران
دورهٔ ۸، شمارهٔ ۳
پاییز ۱۳۹۵
صص. ۴۰۴- ۳۸۱

مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانهٔ ترافیک شهری با شبکه‌های پتری رنگین

خداکرم سلیمی فرد[۱]، مهدی انصاری[۲]

چکیده: مدیریت و کنترل ترافیک خودروها بر شبکه‌ای از خیابان‌ها و تقاطع، در حوزهٔ سامانهٔ کنترل ترافیک شهری است. هدف از انجام این پژوهش، ارائهٔ روشی بر پایهٔ تحقیق در عملیات برای مدل‌سازی سامانهٔ کنترل ترافیک شهری است تا به‌عنوان ابزاری شایسته برای بهبود در ترافیک شهری به‌کار رود. سهم علمی این مقاله در بررسی سیاست‌های زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی در روان‌سازی جریان ترافیک شهری با استفاده از شبکه‌های پتری رنگین است. در این پژوهش، شبکه‌های پتری رنگین به‌عنوان ابزار مدل‌سازی و بهبود سامانه پیشنهاد شده است. بخشی از شبکهٔ ترافیکی شهر بوشهر با روش پیشنهادی مدل‌سازی شده و با کمک شبیه‌سازی گسستهٔ پیشامد سناریوهای بهبود بررسی شد. یافته‌ها نشان داد روش پیشنهادی روش شایسته و کارآمدی برای بهبود در عملکرد سامانهٔ ترافیک شهری است. بر اساس ارزیابی سنجه‌های عملکرد سامانه، راهکار شایسته‌ای برای بهبود ترافیک پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: ترافیک شهری، چراغ راهنمایی، شبکه‌های پتری رنگین، شبیه‌سازی.

۱. دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران
۲. کارشناس‌ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۰۷
تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۸
نویسندهٔ مسئول مقاله: خداکرم سلیمی‌فرد
E-mail: salimifard@pgu.ac.ir

مقدمه

سامانهٔ ترافیک شهری از یگان‌هایی مانند خیابان‌ها، تقاطع‌ها، بزرگراه‌ها و پارکینگ‌ها ساخته شده است. در این میان، تقاطع‌ها که محل برخورد جریان‌های ترافیکی هستند، اهمیت بسزایی دارند. شمار زیادی از تصادف خودروها، دیرکردها و دشواری‌ها، به‌دلیل برخورد جریان‌های ترافیکی در این‌گونه چندراهه‌ها رخ می‌دهد (دی اولیوریا و کامپونگارا، ۲۰۱۰). بنابراین، مدیریت ترافیک خودروها در تقاطع، اهمیت ویژه‌ای در سامانهٔ حمل و نقل شهری دارد. پدیدهٔ راه‌بندان و کندی آمدوشد خودروها یکی از مسئله‌های مهم در شبکه‌های حمل و نقل شهری است.

چراغ راهنمایی ابزار سودمندی برای کنترل جهت، بار و روانی جریان ترافیک خودروها بر سامانهٔ حمل و نقل شهری است. این مقاله، برای به‌کارگیری چراغ راهنمایی در مدیریت ترافیک شهری، در بخشی از سامانهٔ ترافیک شهری در بوشهر که تقاطع‌های گوناگونی دارد، با استفاده از شبکه‌های پتری رنگین، رویکردی نو برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی تقاطع‌ها پیشنهاد می‌دهد. باید یادآوری شود که در پژوهش‌های داخلی، پدیدهٔ ترافیک مورد توجه مهندسان ترافیکی بوده که دید کارشناسی به موضوع داشتند و بیشتر به ساختار جاده، تراکم و چگالی خودروها در مسیر پرداخته‌اند. این پژوهش، از دیدگاه تحقیق در عملیات به پدیدهٔ ترافیک می‌نگرد و نخستین پژوهش کشور در این حوزه است که به‌دنبال بررسی و کنترل ترافیک خودروها با دستیابی به تنظیم شایستهٔ چراغ راهنمایی است. از این رو، هدف این پژوهش روان‌سازی جریان ترافیک، کاهش طول صف خودروها و کاهش مدت زمان انتظار آنها پشت چراغ‌های راهنمایی است. به دیگر سخن، این پژوهش در پی پاسخ به این پرسش است که زمان‌بندی و نیز چرخش زمانی چراغ‌های راهنمایی در چهارراه‌ها، چگونه تنظیم شود تا جریان آمد و شد خودروها روان‌تر باشد. از آنجا که هدف اصلی این پژوهش مدل‌سازی یک پدیدهٔ واقعی با شبکه‌های پتری رنگین و همچنین کاهش بار ترافیکی سامانهٔ مورد مطالعه است، باید این هدف به چند معیار کمی تبدیل شود تا سنجش‌پذیر باشد. از این رو، کاهش طول صف خودروها پشت چراغ که همان شمار خودروهای منتظر است و همچنین مدت زمان انتظار آنها، به‌عنوان معیارهای کمی در نظر گرفته شده‌اند.

در ادامه، مقاله این‌گونه سازماندهی می‌شود. در بخش دوم، پیشینهٔ پژوهش‌های مرتبط آورده می‌شود که دربرگیرندهٔ پیشینهٔ نظری و تجربی است. بخش سوم روش‌شناسی پژوهش است که نخست مدل مفهومی پژوهش ارائه شده و سپس چگونگی مدل‌سازی تقاطع‌های مطالعه‌شده تشریح می‌شود. بخش چهارم به یافته‌های پژوهش اختصاص دارد و نتایج شبیه‌سازی را در قالب جدول‌ها و نمودارها نشان می‌دهد. در بخش نتیجه‌گیری نیز، مقاله جمع‌بندی می‌شود.

پیشینهٔ پژوهش

سیستم‌های مدیریت ترافیک در پی کاهش راه‌بندان، دیرکردها، مصرف سوخت و نیز آلودگی هستند (اسمیت، نیچریستوز و باتلر، ۲۰۱۰). جریان ترافیک از دو دیدگاه خرد و کلان تجزیه و تحلیل می‌شود. در دیدگاه خرد، حرکت هر خودرو مد نظر است و در دیدگاه کلان، متغیرهای کلان ترافیک مانند چگالی، حجم و میانگین سرعت خودروها تجزیه و تحلیل می‌شوند (انصاری، ۱۳۹۰).

پیشینهٔ کنترل ترافیک به پیشینهٔ خودرو، یعنی دههٔ ۱۸۶۰ در لندن بازمی‌گردد؛ هنگامی که یک چراغ راهنمایی برای ایمنی اعضای مجلس در تقاطعی نزدیک آنجا نصب شد. نخستین چراغ راهنمایی امروزی در سال ۱۹۲۰ در دیترویت آمریکا به‌کار گرفته شد. از این شروع ساده و ابتدایی، سیستم‌های کنترل تقاطع‌ها، تابلوهای متغیر، سیستم‌های کنترل سرعت و مانند اینها به‌وجود آمد. کم‌کم، چراغ‌های کنترل ترافیک از ساختار نخستین با زمان‌بندی ثابت به شیوهٔ امروزین خود، یعنی کنترل تقاطع بر اساس شمارش ترافیک موجود بهبود یافت. در سال ۱۹۲۰ در پنج مکان آمریکا، سیستم‌هایی نصب شد که با استفاده از رایانه‌های آن زمان، برنامه‌ریزی شده بودند (رحمان و راتروت، ۲۰۰۹).

در سامانهٔ حمل و نقل شهری، تقاطع‌ها و چراغ‌های راهنمایی نقش مهمی در مدیریت ترافیک خودروها دارند. به سامانهٔ ترافیک شهری می‌توان همچون یک سیستم پویای گسسته نگاه کرد. پویایی این شبکه‌ها به برهم‌کنش پیچیدهٔ زمان‌بندی رویدادهای گسستهٔ گوناگون، مانند تنظیم ورود و خروج خودروها از تقاطع‌ها با استفاده از چراغ‌های راهنمایی بستگی دارد.

با توجه به توانایی شبکه‌های پتری در مدل نمودن همزمانی و ناهمزمانی، این ابزار می‌تواند برای هر دو سطح خرد و کلان سیستم‌های ترافیک شهری به‌کار گرفته شود. نخستین‌بار مدل‌سازی شبکه‌های پتری رنگین چراغ راهنمایی در سال ۱۹۸۶ ارائه شد. پس از آن، ایدهٔ کاربرد شبکه‌های پتری در مدل شبکه‌های ترافیکی در سال ۱۹۹۱ دوباره مطرح شد (وانگ و همکاران، ۱۹۹۳). اوینری (۲۰۰۵) کاربرد روش‌های نرم در سیستم‌های ترافیک و حمل و نقل را بازخوانی کرد و به دسته‌بندی مسئلهٔ ترافیک در قالب روش‌هایی مانند مجموعه‌های فازی، شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک پرداخت. روش‌های علم فیزیک توسط هلبینگ (۲۰۰۲) نیز در شبیه‌سازی دیدگاه‌های خرد و کلان ترافیک بزرگراه استفاده شد. جیل (۲۰۱۵) با استفاده از اطلاعات نقشه‌های آنلاین و سیستم اطلاعاتی جغرافیایی، روشی برای مدل‌سازی چندبخشی از شبکهٔ ترافیک شهری پیشنهاد داد. یوچو و چانگ (۲۰۰۱) در پژوهشی با عنوان کاربرد شبیه‌سازی کامپیوتری در طراحی یک زمان گیرندهٔ علائم ترافیکی، به استفاده از شبیه‌سازی در به‌دست

آوردن بهترین زمان علائم ترافیکی در چهارراه پرداختند و کاهش ۲۰ درصدی زمان انتظار خودروها در پشت چراغ را نتیجه گرفتند. همچنین، دی‌فبرارو و ساکو (۲۰۰۲) با به‌کارگیری شبکه‌های پتری، فاصلهٔ زمانی بهینه‌ای برای هماهنگی مدت زمان چراغ‌های راهنمایی تعیین کردند.

برای ارزیابی عملکرد کنترل ترافیک در چهارراه، تولبا و همکاران (۲۰۰۳) با شبکه‌های پتری زمان‌مند، به مدل‌سازی و ترکیب دو دیدگاه خرد و کلان پرداختند. در مدل پیشنهادی، خیابان‌ها، با نماد جا و جریان آمدوشد خودروها با نماد گذار مدل‌سازی شد. لین، تانگ، مو و شی (۲۰۰۳) در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی سیستم‌های حمل و نقل با هیبریدی، قوت‌ها و ضعف‌های مربوط به مدل‌های خرد و کلان را بررسی کردند. ژانگ و همکاران (۲۰۰۸) نیز با تجزیه و تحلیل سیستم‌های گسستهٔ پیشامد، رویکردی نو برای مدل‌سازی کنترل چراغ‌های راهنمایی پیشنهاد دادند. آنها برای این کار از شبکه‌های پتری استفاده کردند و توانستند سیاست‌های اولویت‌بندی و دیرکرد چراغ‌ها را نیز بررسی کنند. دوتولی و فانتی (۲۰۰۶) با اعتبارسنجی مدل شبکهٔ ترافیکی شهری و با استفاده از شبکه‌های پتری رنگین زمان‌مند، آن را تجزیه و تحلیل کردند. لیست و ستین (۲۰۰۴) با به‌کارگیری شبکه‌های پتری، یک مدل ۸ مرحله‌ای برای مدل‌سازی کنترل چراغ راهنمایی ارائه دادند.

هوانگ و همکاران (۲۰۰۶) مدلی برای چهارراه‌های پیچیده و تعیین فازبندی هر مرحله ارائه کردند و به طراحی و تجزیه و تحلیل چراغ‌های راهنمایی با شبکه‌های پتری رنگین زمان‌مند پرداختند. آنها، کنترل‌کننده‌ای هم برای سامانه‌های ترافیک شهری طراحی کردند که با شبکه‌های پتری رنگین زمان‌مند به مدل‌سازی و شبیه‌سازی ترافیک شهری می‌پرداخت. همچنین، این دو پژوهشگر روش نوینی برای مدل‌سازی چراغ‌های راهنمایی بر اساس شبکه‌های پتری رنگین ارائه دادند و به مدل‌سازی، شبیه‌سازی و گردآوری گراف‌های پیشامد و رابطهٔ میان ویژگی زنده‌بودن شبکه و برگشت‌پذیری پرداختند.

دستیابی به کنترل بهینهٔ چراغ‌های راهنمایی یکی از زمینه‌های پژوهشی در حمل و نقل شهری است. لیست و ستین (۲۰۰۴) برای کنترل چراغ‌های راهنمایی از یک مدل شبکهٔ پتری استفاده کردند. آنها با تغییر در ساختار عملیاتی سیستم، توانستند شیوه‌ای نو برای کنترل چراغ‌های راهنمایی و گذر ایمن خودروها از چهارراه پیشنهاد دهند. بی‌اطمینانی به پیش‌بینی ترافیک در کشور هلند توسط دجانگ و دالی (۲۰۰۷) بررسی شد. در پژوهشی دیگر دوس سانتوس سوآرس و ورانکن (۲۰۰۸) ، مدل‌سازی و استفاده از درخت دسترس‌پذیری برای تجزیه و تحلیل سیستم را به کار گرفتند و تجزیه و تحلیل چراغ‌های جاده‌ای را با شبکه‌های پتری و

منطق خطی انجام دادند. برخی از پژوهشگران کنش میان خودروها و عابران پیاده را مرکز توجه قرار دادند. در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی جریان ترافیک در پیاده‌روها، ژانگ و هولی (۲۰۰۷) در یک شبیه‌سازی خردنگر با ماشین‌های خودکار سلولی و با تمرکز بر رفتار عابران و تأثیر آن بر جریان آمدوشد خودروها و عابران، مدت زمان انتظار خودروها را بررسی کردند.

لی و لی (۲۰۰۸) با مدل‌سازی و ارائهٔ مفاهیم و تحلیل‌های ریاضی، سیستم ترافیک شهری را بر اساس شبکهٔ پتری تصادفی پویا مدل‌سازی کردند. در پژوهشی با عنوان مدل‌های ترافیک جاده‌ای که توسط فارهی، گورسات و کوادرات (۲۰۰۹) به اجرا درآمد، با به‌کارگیری آمیزهٔ شبکه‌های پتری و روش جبری مین‌پلاس، بار ترافیکی خودروها روی جاده مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل شد. در پژوهشی با عنوان طراحی علائم ترافیکی پاسخگو، دوس سانتوس سوآرس و ورانکن (۲۰۰۸) با به‌کارگیری شبکه‌های پتری مدت زمان بهینه برای سبز بودن چراغ‌ها را برآورد کردند. وانگ، جین و دنگ (۱۹۹۹) در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی و ارزیابی کنترل چراغ راهنمایی با شبکهٔ پتری زمان‌مند، کاربردهای شبکه‌های پتری در کنترل چراغ راهنمایی را بررسی و تجزیه و تحلیل کردند. رحمان و راتروت (۲۰۰۹) به‌کارگیری منطق فازی در کنترل علائم راهنمایی در عربستان را بررسی کردند. لوپزنری، رامیرز و لوپز ملادو (۲۰۰۹) با ارائهٔ یک مدل خرد و تشریح شبکهٔ ترافیک و پویایی نهادهایی مانند خودروها، چراغ‌ها و مسافران و به‌کارگیری شبکه‌های پتری، چارچوبی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی خرد سیستم‌های ترافیک شهری ارائه دادند. کیم و یئو (۲۰۱۶) آسیب‌پذیری شبکهٔ جاده‌ای در رویدادهای غیرمنتظره را با دیدگاه کلان ارزیابی کردند. آنها با شبیه‌سازی مدل، به این نتیجه رسیدند که رویدادهای یادشده بر عملکرد شبکهٔ جاده‌ای پیامدهای شگرفی دارد. رفتار زمان‌مند شبکهٔ جاده‌ای موضوع پژوهش ژو و همکاران (۲۰۱۶) بود. آنها با استفاده از زنجیرهٔ مارکف و شبیه‌سازی گسستهٔ پیشامد، احتمالات گذار شبکهٔ جاده‌ای شهری را بررسی کردند. تیان، جیا، دانگ، سو و ژانگ (۲۰۱۶) ویژگی‌های کارکردی شبکهٔ ترافیک شهری را با استفاده از روش‌های آماری بررسی کردند و دریافتند که میان ظرفیت شبکه و کارایی آن، رابطهٔ معناداری وجود دارد. اعتبارسنجی مدل‌های مربوط به ترافیک و خودروها با استفاده از تحلیل‌های آماری توسط اسمیت و همکارانش (۲۰۱۰) مطالعه شد. سلیمی‌فرد و انصاری (۱۳۹۲) نیز در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی و شبیه‌سازی ترافیک شهری، مدلی برای شبیه‌سازی چهارراه با استفاده از نرم‌افزار آرنا[1] ارائه دادند. همچنین، آنها در پژوهش دیگری (۱۳۹۱) چهارراهی با شبکه‌های پتری رنگین را مدل‌سازی و شبیه‌سازی کردند.

1. Arena

بررسی و بازخوانی پژوهش‌های پیشین، بیانگر پرشور بودن مسئلهٔ ترافیک شهری و مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل آن با به‌کارگیری روش‌های گوناگون تحقیق در عملیات است. در این میان، روش شبیه‌سازی یکی از پرطرفدارترین و کارآمدترین روش‌ها برای مدل‌سازی و نیز تجزیه و تحلیل ترافیک شهری است (انصاری، ۱۳۹۰).

برای شبیه‌سازی تعریف‌های زیادی شده است که در هر تعریف به نوعی به یک یا چند ویژگی شبیه‌سازی اشاره شده و در جایگاه خود تعریف درستی است. شبیه‌سازی با ایجاد مدل شبیه‌سازی عملکرد سیستم را با گذشت زمان بررسی می‌کند (آذر، سقالرزاده و رجب‌زاده، ۱۳۹۱). در تعریف فراگیر هو، جیانگ، وانگ و وو (۲۰۰۹) شبیه‌سازی طراحی مدلی از سیستم و انجام آزمایش‌هایی روی آن، برای دستیابی به شناخت از عملکرد یا مقایسهٔ عملکرد سیستم در شرایط مختلف عملیاتی است. در شبیه‌سازی چند مفهوم کلیدی وجود دارد؛ نهاد، یکی از اجزای سیستم است که پژوهشگر به عملکرد یا ویژگی آن توجه‌کرده و آن را بررسی می‌کند. فعالیت، عملی است که در یک فاصلهٔ زمانی با طول مشخص روی یک نهاد انجام می‌شود. وضعیت، حالت سیستم است و ارزش متغیرهای سیستم در یک لحظه یا بازهٔ زمانی را نشان می‌دهد. رویداد نیز چیزی است که با رخداد آن سیستم از یک وضعیت به وضعیت دیگر تغییر می‌کند.

امروزه، روش شبیه‌سازی یکی از پرکاربردترین روش‌ها در مهندسی سیستم‌ها و تحقیق در عملیات است و پس از برنامه‌ریزی خطی، بیشترین کاربرد را در تحلیل سیستم‌ها دارد (انصاری، ۱۳۹۰؛ آقاجانی، صمدی میرکلایی و لطفی، ۱۳۹۳؛ آذر، حقی‌فام و علی‌بابایی، ۱۳۸۷). با استفاده از این روش، تحلیلگر می‌تواند در هر زمان تغییرات لازم را به آسانی در مدل ایجاد کرده و نتیجهٔ تصمیم خود را پس از اجرای آن بررسی کند. افزون بر آسانی نسبی کاربرد، یکی دیگر از دلایل علاقه‌مندی پژوهشگران به شبیه‌سازی آن است که بیشتر سیستم‌های دنیای واقعی آنچنان پیچیده‌اند که مدل‌سازی آنها با روش‌های بهینه‌سازی را نیز، به‌شدت پیچیده می‌کنند (صادقی مقدم، خاتمی فیروزآبادی و ربانی، ۱۳۹۰).

خلاصهٔ پیشینهٔ پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. در یک جمع‌بندی از این بخش، می‌توان گفت که بررسی شبکهٔ جاده‌ای شهری یکی از حوزه‌های پژوهشی است که از دههٔ گذشته، به‌دلیل سریع‌تر و پیچیده‌تر شدن سیستم آمدوشد خودروها در شهر، اهمیت زیادی یافته است. شبکه‌های پتری یکی از ابزارهای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل است که در این زمینه به‌کار می‌رود. افزون‌بر شبکه‌های کلاسیک، گونه‌های زمان‌مند و رنگین از پرطرفدارترین ابزارهای به‌کار رفته است. در این مقاله از شبکه‌های پتری رنگین و شبیه‌سازی گسستهٔ پیشامد برای الگوسازی و تجزیه و تحلیل سامانهٔ ترافیک شهری و اهمیت چراغ راهنمایی بهره برده شده است.

جدول ۱. چکیدهٔ پیشینهٔ پژوهش

مسئله	روش مدل‌سازی	منبع
مدل‌سازی چراغ راهنمایی	شبکه‌های پتری کلاسیک	وانگ و همکاران (۱۹۹۳)؛ دی فبرارو و همکاران (۲۰۰۲)؛ تولبا و همکاران (۲۰۰۳)؛ لین و همکاران (۲۰۰۳)؛ لیست و ستین (۲۰۰۴)؛ هوانگ و همکاران (۲۰۰۶)؛ دوس سانتوس سوآرس و ورانکن (۲۰۰۸)، فارهی و همکاران (۲۰۰۹)؛ لوپزنری و همکاران (۲۰۰۹)
سیستم ترافیک و حمل و نقل	فازی و روش‌های نرم	اوینری (۲۰۰۵)؛ رحمان و راتروت (۲۰۰۹)؛ لوپزنری و همکاران (۲۰۰۹)
طراحی نمادهای ترافیکی	شبیه‌سازی	یوچو و چانک (۲۰۰۱)؛ دوس سانتوس سوآرس و ورانکن (۲۰۰۸)
آمیختهٔ دیدگاه خرد و کلان مدل‌سازی سیستم ترابری شهری	روش‌های آماری و ریاضی	تولبا و همکاران (۲۰۰۳)؛ لین و همکاران (۲۰۰۳)؛ دوتولی و فانتی (۲۰۰۶)؛ ژانگ و هولی (۲۰۰۷)؛ اسمیت و همکاران (۲۰۱۰)؛ کیم و یئو (۲۰۱۶)؛ ژو و همکاران (۲۰۱۶)
بررسی رفتار چهارراه و جریان ترافیک	شبکهٔ پتری رنگین	هوانگ و همکاران (۲۰۰۶)؛ دجانگ و دالی (۲۰۰۷)؛ ژانگ و هولی (۲۰۰۷)؛ لی و لی (۲۰۰۸)؛ سلیمی‌فرد و انصاری (۱۳۹۱)
	شبکه‌های پتری زمان‌مند	وانگ، جین و دنگ (۱۹۹۹)

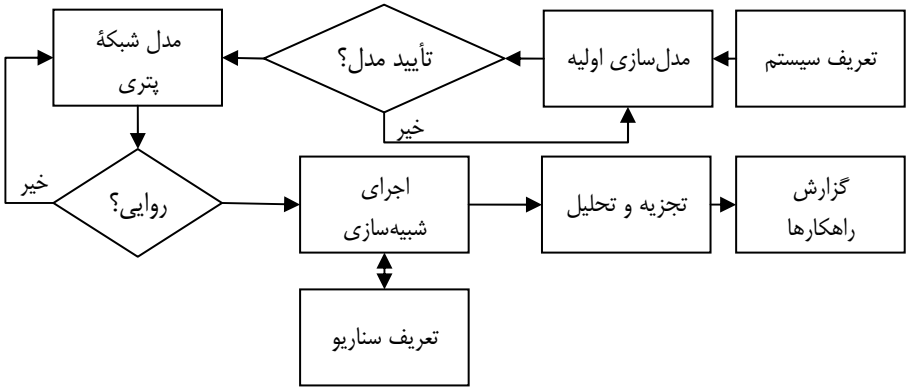
روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نوع کاربردی ـ توسعه‌ای است. کاربردی از این جنبه که مدل ارائه‌شده در وضعیت واقعی مطالعه می‌شود و توسعه‌ای به این دلیل که نسبت به مدل‌های همانند از توانایی‌های بیشتری برخوردار است. این پژوهش از توانایی شبکه‌های پتری و روش شبیه‌سازی استفاده می‌کند. جامعهٔ آماری این پژوهش سامانهٔ حمل و نقل زمینی شهر بوشهر است، ولی به‌دلیل محدودیت‌های زمانی و مکانی، برشی از این سامانه به‌عنوان جامعهٔ آماری این مطالعه در نظر گرفته شده است.

مسئلهٔ ترافیک تاکنون از جنبه‌های مختلف بررسی شده و مهندسان ترافیک دربارهٔ این موضوع مطالعات زیادی کرده‌اند. این پژوهش در زمرهٔ نخستین پژوهش‌های حوزهٔ مدیریتی کنترل ترافیک شهری است و تا کنون در این زمینه در کشور تحقیقی انجام نشده است.

شبکه‌های پتری رنگین یکی از قدرتمندترین روش‌های پژوهش عملیاتی است که همزمان به قواعد دستوری و معنایی مسئله توجه می‌کند و از ابزارهای فضای وضعیت و روش شبیه‌سازی نیز بهره می‌برد؛ یعنی امکان اعتبارسنجی مدل به‌طور ذاتی درون این روش است که در

روش‌های شبیه‌سازی دیگر وجود ندارد. این توانایی‌های کلیدی باعث شد تا در این پژوهش از این شبکه‌ها استفاده شود.



شکل ۱. روند اجرای پژوهش

روند اجرای پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. با تعریف سیستم، مدل‌سازی اولیه انجام شده و پس از تأیید مدل توسط خبرگان، مدل شبکهٔ پتری سیستم تهیه می‌شود. سپس، برای اطمینان از درستی مدل، شبکهٔ پتری سیستم اعتبارسنجی شده و مدل شبیه‌سازی می‌شود. مدل شبیه‌سازی برای سناریوهای گوناگونی که دربرگیرندهٔ تغییر در زمان چراغ‌ها و الگوهای ورود است، به اجرا درمی‌آید و در نهایت پس از کسب گزارش از مدل، نتایج به‌دست‌آمده به دنیای واقعی تعمیم داده می‌شود. در این پژوهش یک سامانهٔ ترافیکی که چند تقاطع دارد، با استفاده از شبکه‌های پتری رنگین، مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است.

شبکهٔ پتری، نوعی روش مدل‌سازی برای توصیف سیستم‌های توزیع‌شده، همزمان[1] و هم‌جریان[2] در سطح‌های مختلف انتزاع است. شبکه‌های پتری مدل‌هایی از جنبه‌های ساختاری و رفتاری یک سیستم گسستهٔ پیشامد را ارائه می‌دهند. همچنین، این روش چارچوبی برای تحلیل، اعتبارسنجی و ارزیابی کارایی و قابلیت اطمینان مدل فراهم می‌آورد (پراس و باچمن، ۲۰۰۹).

جنسن (۱۹۹۴) شبکهٔ پتری رنگین را بر اساس شبکهٔ پتری کلاسیک معرفی کرد. در این شبکهٔ افزون‌بر مکان، گذار و خال، از مفاهیم رنگ، گارد[3] و عبارات[4] استفاده می‌شود. در این

1. Concurrency
2. Synchronization
3. Guard
4. Expression

شبکه‌ها مقادیر داده‌ای با خال‌ها جابه‌جا می‌شوند. شبکه‌های پتری رنگین مدل‌های دقیق‌تری از سیستم‌های پردازشی غیر همزمان و پیچیده ارائه می‌دهند. در این شبکه‌ها، برخلاف شبکه‌های پتری کلاسیک، خال‌ها با داشتن صفت رنگ از یکدیگر تشخیص داده می‌شوند. در توصیف رسمی، یک شبکهٔ پتری رنگین در واقع یک نه‌گانه است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود (جنسن، ۱۹۹۴):

$$CPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I)$$ رابطهٔ ۱)

Σ معرف مجموعهٔ متناهی و نامتناهی از رنگ‌ها؛ P معرف مجموعهٔ متناهی از مکان‌ها و T نشان‌دهندهٔ مجموعهٔ متناهی از گذارهاست.

A مجموعهٔ متناهی از کمان‌هاست به‌گونه‌ای که $P \cap T = T \cap A = \phi$؛

N تابع گره است که از A به $P\times T \cup T\times P$ تعریف می‌شود؛

C تابع رنگ از P به Σ است؛

G تابع گارد است که روی T به‌گونهٔ زیر تعریف می‌شود:

$$\forall t \in T: \left[Type(G(t) = Bool \wedge Type(Var(G(t))) \subseteq \sum\right]$$

E معرف تابع عبارت کمان روی A به‌شکل زیر است:

$$\forall_a \in A: \left[Type(E(a) = C(p(a)_{MS} \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \sum\right]$$

p(a) یک مکان از N(a) است.

I نشان‌دهندهٔ تابع آغازین است. این تابع از P به عبارت‌های بسته‌ای به‌صورت زیر است:

$$\forall_p \in P: [Type(I(P)) = C(p)_{MS}]$$

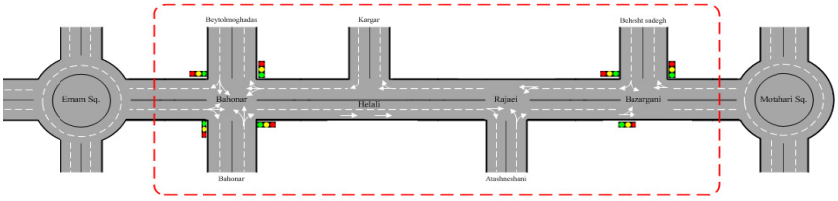
زمان، یکی از مفاهیم شایان توجه در شبیه‌سازی سیستم‌هاست. در شبکه‌های پتری رنگین، مفهوم زمان با به‌کارگیری عنصری به نام ساعت همگانی[1] مدل می‌شود. مقادیری که این ساعت به خود می‌گیرد بیان‌کنندهٔ زمان در مدل است، مثلاً اگر مقدار ساعت ۲۵۳ باشد، بدین معناست که تاکنون ۲۵۳ واحد زمان گذشته است. این زمان می‌تواند عدد صحیح (نشان‌دهندهٔ زمان گسسته) یا عدد حقیقی (بیان‌کنندهٔ زمان پیوسته) باشد (انصاری، ۱۳۹۱).

با گردآوری داده‌ها از دنیای واقعی، مدل داده‌ها تهیه و روی مدل شبکهٔ پتری رنگین از سیستم توزیع می‌شود. گردآوری داده‌ها از نوع نمونه‌گیری تصادفی است، به این صورت که در یک فاصلهٔ زمانی مشخص و در چند نوبت از ورودی‌های تصادفی تقاطع‌های مربوطه، داده‌هایی جمع آوری شده است. به این صورت که در نخستین زمان‌گیری تعداد خودروهایی که پشت چراغ

1. Global Clock

قرمز منتظر ماندند، شمرده شدند و طول صف خودروها پشت هر چراغ اندازه‌گیری شد. در مرحلهٔ بعد توزیع ورود خودروها مشخص شد و در آخرین مرحله از گردآوری داده‌ها، ضمن شمارش تعداد خودروهایی که از تقاطع عبور کردند، مشخص شد که چه تعداد به سمت راست و چه تعداد به سمت چپ پیچیدند و چه تعداد به‌صورت مستقیم به مسیر خود ادامه دادند. این کار برای همهٔ مسیرهای ورودی به سیستم انجام شد. نمونه‌گیری و گردآوری داده‌ها در بازهٔ زمانی یک‌ماهه و در چندین مقطع زمانی در روزهای گوناگون از ماه انجام گرفت. برای دستیابی به توزیع شایستهٔ آماری از داده‌ها، آزمون‌های رایج نیکویی برازش به اجرا درآمد

با به‌کارگیری نرم‌افزار CPN Tools (۲۰۱۳) که قوی‌ترین ابزار مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه‌های پتری رنگین است، مدل شبیه‌سازی می‌شود. افزون‌بر این، به ازای هر سیاست کنترلی، سناریویی تعریف شده و مدل بر اساس آن شبیه‌سازی می‌شود.

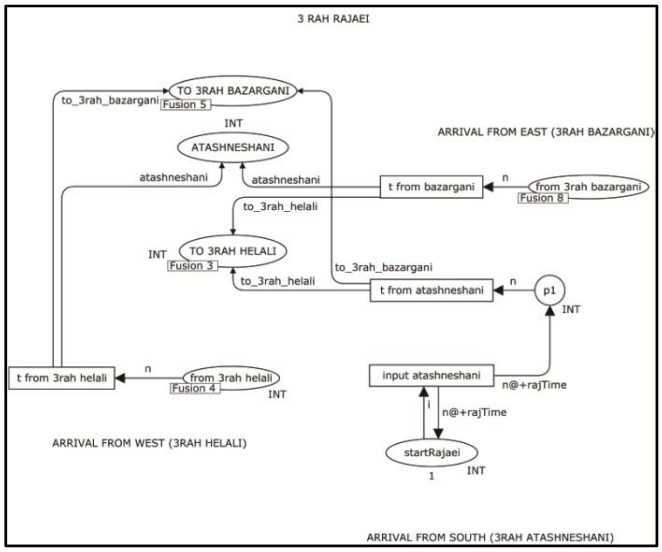


شکل ۲. نمای کلی سامانهٔ ترافیکی مطالعه‌شده

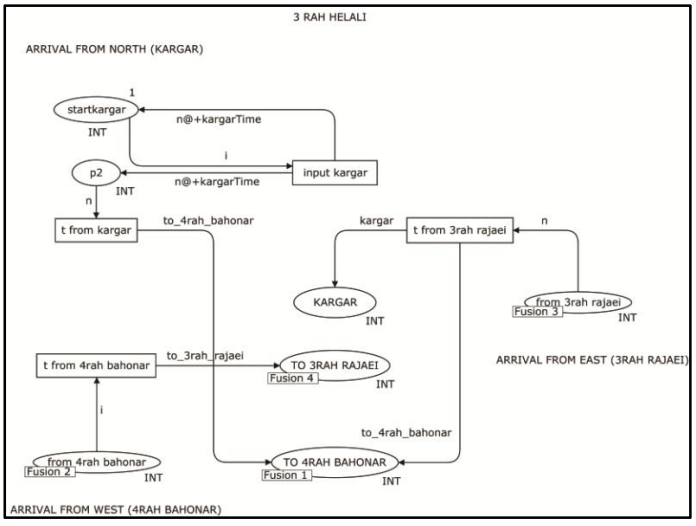
شکل ۲ نشان‌دهندهٔ نمای کلی سامانهٔ ترافیکی مورد مطالعه است که چهار تقاطع به نام‌های سه‌راه بازرگانی، سه‌راه رجایی، سه‌راه هلالی و چهارراه باهنر را شامل می‌شود. هر یک از تقاطع‌ها ویژگی یکسانی از دیدگاه ساختاری و مدل‌سازی دارند. تقاطع سه‌راه بازرگانی دارای سه چراغ است و از شمال به خیابان بیت‌المقدس، از شرق به میدان مطهری و از غرب به سه‌راه رجایی متصل می‌شود. تقاطع بعدی سه‌راه رجایی است که چراغی ندارد و خودروها در انتخاب مسیر آزادند. این تقاطع از شرق به سه‌راه بازرگانی، از جنوب به خیابان آتش‌نشانی و از غرب به سه‌راه هلالی راه دارد. تقاطع سه‌راه هلالی مانند سه‌راه رجایی چراغی ندارد و تفاوت آن با سه‌راه رجایی در این است که خودروها برای انتخاب مسیر خود آزادی عمل ندارند و نمی‌توانند به هر مسیری گردش کنند. دقت در جهت پیکان‌های هر تقاطع در شکل ۲، به خوبی این تفاوت‌های ساختاری را نشان می‌دهد. این تقاطع از شرق به سه‌راه رجایی، از شمال به خیابان کارگر و از غرب به چهارراه باهنر ارتباط دارد. آخرین تقاطع چهارراه باهنر است. چهار چراغ راهنمایی در این چهارراه وجود دارد که هر یک دارای زمان‌های از پیش تعیین‌شدهٔ متفاوتی نسبت به هم هستند. با ورود خودرو به چهارراه و در صورت سبز بودن چراغ، خودرو می‌تواند به سمت راست، مستقیم یا چپ

برود. این چهارراه از شرق به سه‌راه هلالی، از شمال به خیابان بیت‌المقدس، از جنوب به خیابان باهنر و از غرب به میدان امام مرتبط است.

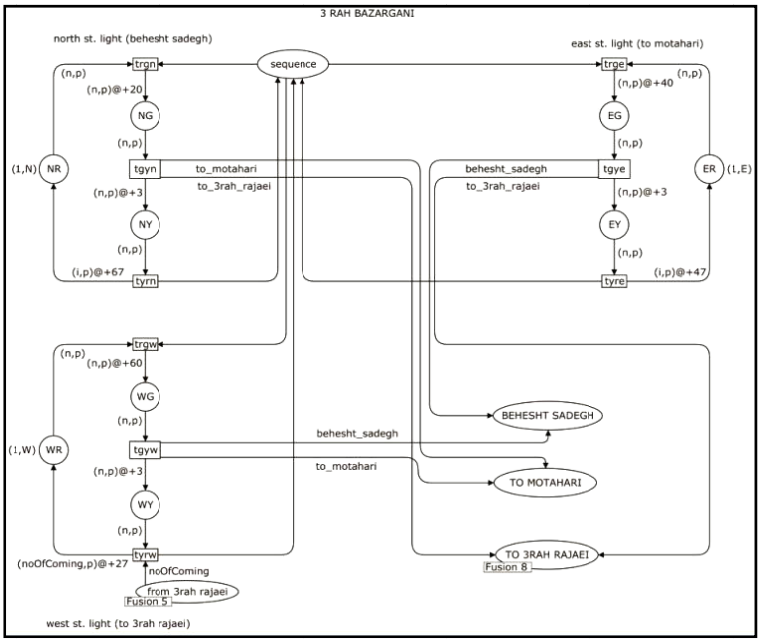
در ادامه مدل‌های هر تقاطع از شبکهٔ ترافیکی آورده شده است که برای صرفه‌جویی در نگارش فقط به توضیح دقیق مدل چهارراه باهنر پرداخته می‌شود.



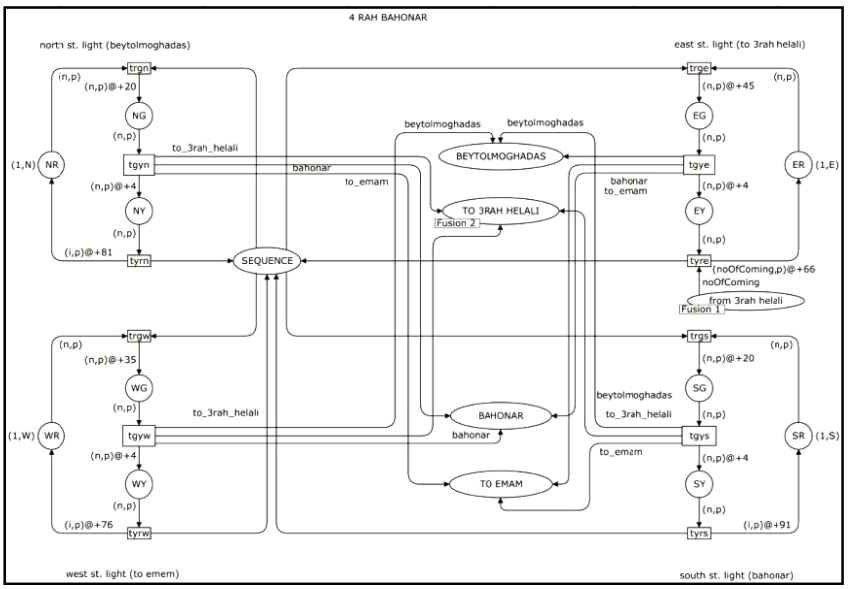
شکل۳. مدل شبکه‌های پتری رنگین سه‌راه رجایی



شکل ٤. مدل شبکه‌های پتری رنگین سه‌راه هلالی



شکل ۵. مدل شبکه‌های پتری رنگین سه‌راه بازرگانی



شکل ٦. مدل شبکه‌های پتری رنگین چهارراه باهنر

مدل شبکهٔ پتری رنگین چهارراه باهنر در شکل ۶ نشان داده شده است. در این مدل از ۱۸ مکان و ۱۲ گذار استفاده شده که از این تعداد، ۱۲ مکان و گذار برای مدل‌سازی چراغ‌های راهنمایی، ۵ مکان برای مدل‌سازی آمدوشد خودروها و ۱ مکان نیز برای مدل قرار دادن توالی اجرای چراغ‌ها وجود دارد. در ادامه، توضیح شکل ۶ در سه بخش چراغ‌های راهنمایی، گردش اجرای خودروها و آمدوشد آنها که از عناصر اصلی مدل ساخته شده‌اند، آورده می‌شود.

چراغ‌های راهنمایی

این چهارراه، چهار چراغ راهنمایی دارد. هر یک از چراغ‌ها با ۳ مکان و ۳ گذار مدل شده است. هر مکان یکی از رنگ‌های سبز، زرد و قرمز را نشان می‌دهد و نام هر چراغ روی مدل ثبت شده است، مثلاً چراغ خیابان باهنر در سمت راست و پایین مدل south St. Light (bahonar) نام‌گذاری شده است. مکان‌های SR، SG و SY، به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ وضعیت‌های قرمز، سبز و زرد این چراغ است. مدت زمان وضعیت‌های سه‌گانهٔ هر چراغ در دنیای واقعی نیز اندازه‌گیری و در این مدل گذاشته شده است. برای مثال، مدت زمان سبز بودن چراغ خیابان باهنر ۲۰ ثانیه و قرمز بودن آن ۸۱ ثانیه است. همان‌طور که دیده می‌شود این مدت زمان‌ها با نماد 20+@ و 81+@ روی مدل نشان داده شده است. روی هر کمان عبارت دو متغیری (n,p) نشان داده شده که n معرف شمار خودروها و p گویای نوع خودروهاست. گذار میانی جاهای سبز و زرد هر چراغ، گذار شاخه‌زنی است. این گذار، خودروهای گذرنده از چراغ را به سه مسیر مختلف راست، مستقیم و چپ می‌فرستد. برای نمونه، گذار tgys که میان جاهای SG و SY است، خودروهای ورودی از خیابان باهنر را بین سه مسیر خیابان بیت‌المقدس، سه‌راه هلالی و میدان امام پخش می‌کند. شمار خودروهای پخش‌شده در هر یک از مسیرهای سه‌گانه با فراخوان یک تابع توزیع احتمال برآورد می‌شود.

گردش اجرای چراغ‌ها

برای پیشگیری از برخورد خودروها، روش کار چراغ‌های راهنمایی در یک چهارراه واقعی این‌طور است که اگر یک چراغ سبز باشد، چراغ‌های دیگر باید قرمز باشند. بی‌گمان، یکی از شرایط واقعی بودن مدل، اجرای این اصل است. مکان Sequence در مدل، این نقش را دارد. هر یک از گذارهایی که نقش تغییر رنگ چراغ از قرمز به سبز را دارند، نیازمند وجود یک خال[1] در Sequence هستند. یعنی با شلیک یکی از گذارهای trgn، trgs، trge، و trgw، خال موجود درSequence مصرف می‌شود و دیگر گذارها، تا جاگذاری خال بعدی در Sequence امکان‌پذیر

1. Token

نشده و شلیک نخواهند شد. به دیگر سخن، این چهار گذار با هم در تضادند و شلیک یکی، شلیک شدن سه گذار دیگر را غیرممکن می‌کند.

آمدوشد خودروها

برون‌رفت خودروها از چهارراه به هر یک از چهار خیابان خروجی است. برای هر خیابان خروجی یک مکان معرف خودروهای خروجی از چهارراه به آن خیابان است. برای نمونه مکان Beytolmoghadas برای مدل قرار دادن خودروهای خروجی به سوی خیابان بیت‌المقدس است. بدین‌سان مکان‌های Bahonar، To 3Rah Helali و To Emam نیز برای سه خیابان دیگر به‌کار رفته‌اند. این جاها نشان‌دهندهٔ مقصد خودروهایی هستند که از چراغ گذر می‌کنند. روال کار این گونه است که هر خودرو پس از تعیین مسیر خود، با توجه به عبارت‌ها و پیش شرط‌هایی که روی هر کمان و در ناحیهٔ کدنویسی اعمال می‌شود، به یکی از این چهار جا وارد می‌شود. ورود خال خودرو به هر یک از این چهار مکان در مدل، بیان‌کنندهٔ ورود خودرو به خیابان همسان آن در دنیای واقعی است.

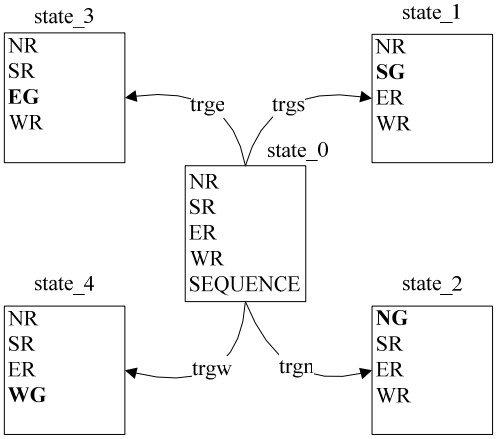
اعتبارسنجی مدل

یک مدل هنگامی می‌تواند پایه‌ای استوار برای تجزیه و تحلیل باشد که مدل‌ساز بتواند نشان دهد که مدل، ارائه‌دهندهٔ شایسته و معتبری از سیستم واقعی است. در شبیه‌سازی، برای سنجش اعتبار الگو باید دو گام تأیید مدل[1] و روایی‌سنجی آن[2] طی شود. تأیید مدل، اطمینان‌یابی از این است که فرضیات سیستم، به‌درستی در مدل اجرا شده باشد. روایی‌سنجی مدل به این معناست که مدل ارائهٔ منطقی از سیستم است و اجرای آن با کارکرد سیستم واقعی سازگاری دارد.

شبکه‌های پتری برای اعتبارسنجی مدل، ابزارهای کارآمدی در اختیار مدل‌ساز قرار می‌دهند. یکی از ابزارهای اعتبارسنجی، گراف، رخداد[3] است. ایدهٔ این ابزار، در واقع ساخت گرافی است که برای هر وضعیت در دسترس دربرگیرندهٔ یک گره باشد و نیز کمان‌هایی که نشان‌دهندهٔ گذار از یک وضعیت به وضعیت‌های در دسترس است. در شکل ۷ بخشی از گراف رخداد برای مدل ارائه شده در شکل ۶ نشان داده شده است. در این گراف، سیستم ابتدا در وضعیت state_0 است که در آن مکان‌های NR، SR، ER، WR و Sequence دارای خال هستند. یعنی هر ۴ چراغ در وضعیت آغازی به رنگ قرمزند و یک خال نیز در *Sequence* به معنای آماده بودن سیستم برای تغییر وضعیت است.

---

1. Model verification
2. Model validation
3. Occurrence Graph (OG)



شکل ۷. بخشی از گراف‌های رخداد شبکه

با شلیک گذار، trgs سیستم از وضعیت state_0 به وضعیت state_1 گذر می‌کند. در این وضعیت، چراغ جنوبی (خیابان باهنر) سبز شده و سه چراغ دیگر همچنان قرمز هستند. پیامد این شلیک این است که دیگر در Sequence خال نیست. این نبود خال از شلیک شدن گذارهایی که چراغ‌های دیگر را به رنگ سبز تغییر می‌دهند، پیشگیری می‌کند. این رفتار مدل، با رفتار سیستم واقعی، همسان بوده و نشان‌دهندهٔ درستی مدل است. برای بررسی اعتبار مدل، گراف رخداد کامل شبکهٔ ساخته شده و همه وضعیت‌های ممکن و نیز گذار میان آنها بررسی شد.

یافته‌های پژوهش

در بخش پیشین ضمن بیان چگونگی مدل‌سازی هر چهار تقاطع، برای نمونه، مدل چهارراه باهنر تشریح شد. در این بخش یافته‌های شبیه‌سازی مدل آورده می‌شود. این یافته‌ها در برگیرندهٔ میانگین شمار خودروهای پشت هر چراغ است. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، مدل شبکهٔ پتری رنگین این سیستم، روی بستهٔ نرم‌افزاری CPN Tools اجرا شد و با به‌کارگیری شبیه‌سازی این نرم‌افزار، نتایج شبیه‌سازی در جدول ۲ آورده شده است. برای مثال دیده می‌شود که به‌طور میانگین ۱۲ خودرو در پشت چراغ قرمز خیابان باهنر منتظر هستند. این میانگین برای خیابان بیت‌المقدس ۹ خودرو است.

یکی از مهم‌ترین سیاست‌های کنترلی در سامانهٔ ترافیک شهری، تعیین مدت زمان سبز یا قرمز بودن چراغ‌های راهنمایی است. تغییر مدت زمان چراغ‌ها به دو شیوهٔ ثابت و متغیر است. در شیوهٔ ثابت، مدت زمان هر یک از وضعیت‌های سه‌گانهٔ چراغ‌ها بدون توجه به چگونگی آمدوشد

خودروها و در هر شرایط ترافیکی، ثابت است. در شیوهٔ دوم، این مدت زمان بر اساس چگونگی جریان آمدوشد خودروها تغییر می‌کند (انصاری، ۱۳۹۰).

در این پژوهش، سیاست کنترلی مدت زمان ثابت در نظر گرفته شده است. این شیوه به‌عنوان نوعی سیاست کنترلی روی مدل شبیه‌سازی استفاده می‌شود. جدول ۳ سناریوهای تعریف‌شده برای مدل شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. با شبیه‌سازی هر یک از سناریوهای یادشده در جدول ۳، تأثیر آنها روی سیستم بررسی می‌شود.

جدول ۲. میانگین شمار خودروها پشت هر چراغ

چراغ	میانگین
چهارراه باهنر، چراغ شمالی، خیابان بیت‌المقدس	۹
چهارراه باهنر، چراغ شرقی، به سمت سه‌راه هلالی	۳۶
چهارراه باهنر، چراغ جنوبی، خیابان باهنر	۱۲
چهارراه باهنر، چراغ غربی، به سمت میدان امام	۳۴
سه‌راه بازرگانی، چراغ شمالی، خیابان بهشت صادق	۱۵
سه‌راه بازرگانی، چراغ شرقی، به سمت میدان مطهری	۳۹
سه‌راه بازرگانی، چراغ غربی، به سمت سه‌راه رجایی	۴۱

جدول ۳. سناریوهای کنترلی

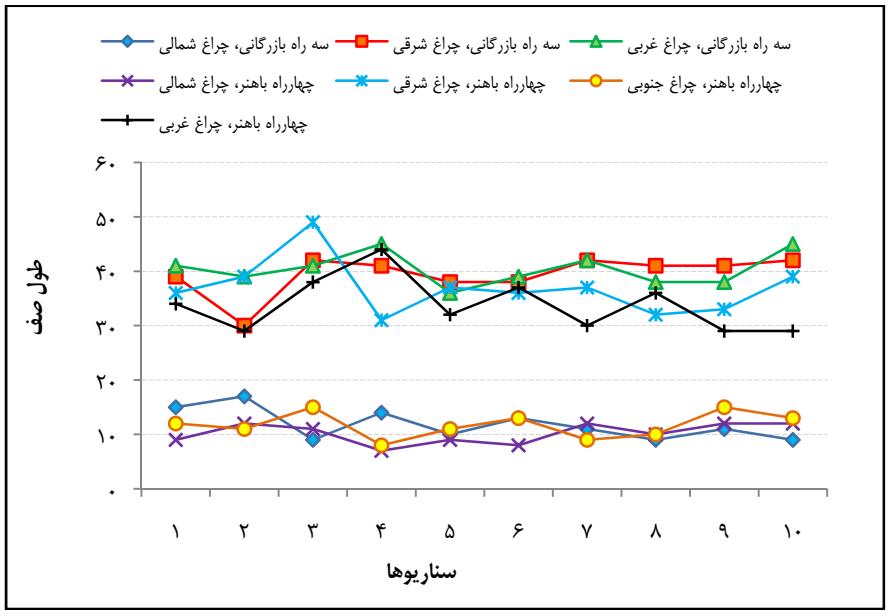
سناریوها	تغییر در زمان‌بندی چراغ‌ها
۱	وضعیت کنونی (نبود تغییر)
۲	افزایش زمان سبز بودن چراغ غربی چهارراه باهنر از ۳۵ ثانیه به ۴۵ ثانیه
۳	کاهش زمان سبز بودن چراغ غربی چهارراه باهنر از ۳۵ ثانیه به ۲۵ ثانیه
۴	کاهش زمان سبز بودن چراغ غربی سه‌راه بازرگانی از ۶۰ ثانیه به ۵۰ ثانیه
۵	افزایش زمان سبز بودن چراغ غربی سه‌راه بازرگانی از ۶۰ ثانیه به ۷۰ ثانیه
۶	افزایش زمان سبز بودن چراغ شرقی سه‌راه بازرگانی از ۴۰ ثانیه به ۴۵ ثانیه
۷	کاهش زمان سبز بودن چراغ شرقی سه‌راه بازرگانی از ۴۰ ثانیه به ۳۵ ثانیه
۸	افزایش زمان سبز بودن چراغ شمالی سه‌راه بازرگانی از ۲۰ ثانیه به ۳۰ ثانیه
۹	افزایش همزمان مدت زمان چراغ شرقی چهارراه باهنر از ۴۵ ثانیه به ۵۰ ثانیه و چراغ غربی چهارراه باهنر از ۳۵ ثانیه به ۴۵ ثانیه
۱۰	کاهش همزمان مدت زمان چراغ شرقی سه‌راه بازرگانی از ۶۰ ثانیه به ۵۰ ثانیه و چراغ غربی سه‌راه بازرگانی از ۴۰ ثانیه به ۳۰ ثانیه

جدول ٤. میانگین شمار خودرو در پشت هر چراغ با اعمال سناریو

چراغ‌های راهنمایی		سناریوها																	
		۱		۲		۳		٤		٥		٦		۷		۸		۹		۱۰	
		طول صف	زمان چراغ	طول صف	زمان چراغ	طول صف	زمان چراغ	طول صف	زمان چراغ	طول صف	زمان چراغ	طول صف	زمان چراغ	طول صف	زمان چراغ	طول صف	زمان چراغ	طول صف	زمان چراغ	طول صف	زمان چراغ
		(تعداد)	(ثانیه)	(تعداد)	(ثانیه)	(تعداد)	(ثانیه)	(تعداد)	(ثانیه)	(تعداد)	(ثانیه)	(تعداد)	(ثانیه)	(تعداد)	(ثانیه)	(تعداد)	(ثانیه)	(تعداد)	(ثانیه)	(تعداد)	(ثانیه)
سه‌راه بازرگانی، چراغ شمالی		۱۵	۲۰	۱۷	۲۰	۹	۲۰	۱۴	۲۰	۱۰	۲۰	۱۳	۲۰	۱۱	۲۰	۹	۳۰	۱۱	۲۰	۹	۲۰
سه‌راه بازرگانی، چراغ شرقی		۳۹	۴۰	۳۰	۴۰	۴۲	۴۰	۴۱	۴۰	۳۸	۴۵	۳۸	۳۵	۴۲	۴۰	۴۱	۴۰	۴۱	۳۰	۴۲	۴۰
سه‌راه بازرگانی، چراغ غربی		۴۱	۶۰	۳۹	۶۰	۴۱	۶۰	۴۵	۵۰	۳۶	۷۰	۳۹	۶۰	۴۲	۶۰	۳۸	۶۰	۳۸	۵۰	۴۵	۵۰
چهارراه باهنر، چراغ شمالی		۹	۲۰	۱۲	۲۰	۱۱	۲۰	۷	۲۰	۹	۲۰	۸	۲۰	۶	۲۰	۳۳	۲۰	۱۲	۲۰	۱۲	۲۰
چهارراه باهنر، چراغ شرقی		۳۶	۴۵	۳۹	۴۵	۴۹	۴۵	۳۱	۴۵	۴۴	۴۵	۴۹	۴۵	۳۷	۴۵	۳۲	۴۵	۳۲	۵۰	۳۹	۴۵
چهارراه باهنر، چراغ جنوبی		۱۲	۲۰	۱۱	۲۰	۱۵	۲۰	۸	۲۰	۱۱	۲۰	۱۳	۲۰	۹	۲۰	۱۰	۲۰	۱۵	۲۰	۱۳	۲۰
چهارراه باهنر، چراغ غربی		۳۴	۳۵	۲۹	۴۵	۳۸	۲۵	۴۴	۳۵	۴۱	۳۵	۳۷	۳۵	۳۰	۳۵	۳۶	۳۵	۲۹	۴۵	۲۹	۳۵

اثر تغییر در مدت زمان سبز بودن چراغ‌ها بر میانگین شمار خودروها در پشت هر چراغ در جدول ۴ نشان داده شده است. این جدول اثر هر یک از ۱۰ سناریو را روی چراغ‌ها نشان می‌دهد. برای هر سناریو، دو ستون مدت زمان چراغ و طول صف خودروها در پشت چراغ تعریف شده است. سناریو ۱ گویای وضعیت کنونی سیستم است.

همان‌گونه که در جدول ۴ دیده می‌شود، در وضعیت کنونی میانگین شمار خودروها در پشت چراغ شرقی چهارراه باهنر ۳۶ خودرو است. با اجرای سناریوی دوم (یعنی افزایش زمان سبز بودن چراغ غربی چهارراه باهنر از ۳۵ ثانیه به ۴۵ ثانیه)، این میانگین به عدد ۲۹ کاهش می‌یابد. این سناریو موجب تغییر در میانگین سایر مسیرها نیز می‌شود. این تغییرها در جدول ۴ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، به‌کارگیری هر سناریو میانگین شمار خودروها را تغییر می‌دهد. همچنین شکل ۸، عملکرد سیستم را به نمایش گذاشته است.



شکل ۸. عملکرد سیستم با اجرای سناریوهای گوناگون

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

شناخت گلوگاه در شبکه‌های ترافیکی یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی سیستم است. این شناخت، دید گسترده‌ای از سیستم ارائه می‌دهد و نقاط بهبودیافتنی را برای تصمیم‌گیرندگان

مشخص می‌کند. همان‌گونه که در جدول ۱ دیده می‌شود، مسیرهای شرقی و غربی چهارراه باهنر و همچنین مسیرهای شرقی و غربی سه‌راه بازرگانی بیشترین شمار خودروهای منتظر را دارند. به سخن دیگر، در وضعیت کنونی این چهار مسیر گلوگاه سیستم‌اند. از این رو، کاهش شمار خودروهای منتظر در این مسیرها از اولویت برخوردار است. شکل ۸ به‌خوبی نشان می‌دهد که سناریو شمارهٔ ۵ بهترین عملکرد را در مسیرهای پر ازدحام دارد و با اجرای این سناریو، طول صف خودروها از وضعیت کنونی (سناریو ۱) بسیار کمتر می‌شود. در واقع، این سناریو توانسته است میانگین شمار خودروهای مسیر هلالی و امام را به‌ترتیب ۲۵ درصد و ۲۳ درصد کاهش دهد. باید یادآور شد که مسیرهای شرق به غرب و نیز، غرب به شرق چهارراه باهنر و سه‌راه بازرگانی، از مسیرهای مهم و اصلی آمدوشد خودروهای شهر بوشهر هستند و بهبود این مسیرها اثر شگرفی بر سیستم ترافیک درون‌شهری بوشهر می‌گذارد.

با اجرای سناریوهای مختلف می‌توان تغییر شمار خودروهای پشت هر چراغ را بررسی کرد، یعنی با اجرای این روش می‌توان روان بودن آمدوشد خودروهای هر مسیر را کنترل کرد؛ بدین شیوه که با تغییر در زمان سبز بودن چراغ‌ها، بار ورودی و خروجی هر مسیر بررسی می‌شود. این مقاله در راستای مقالهٔ پیشین نویسندگان (سلیمی فرد و انصاری، ۱۳۹۱) است و نشان می‌دهد که در دنیای واقعی و پیچیده، شبکه‌های پتری رنگین، توانایی مدل‌سازی ترافیک شهری در تقاطع را دارند. در این پژوهش، به مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانهٔ ترافیک شهری پرداخته شد که دربرگیرندهٔ چند تقاطع با ویژگی‌های متفاوت است، یعنی برخی از تقاطع‌ها دارای چراغ راهنمایی هستند و برخی دیگر چراغ راهنمایی ندارند. همچنین در برخی از این تقاطع‌ها خودروها مجازند به هر سمتی گردش و حرکت کنند، ولی در برخی این امکان وجود ندارد. این موضوع در روش‌شناسی پژوهش به‌طور کامل توضیح داده شد. آشکار است که با وجود امکانات رایانه‌ای و پردازشی، امکان مدل‌سازی و شبیه‌سازی بخش‌های بزرگ‌تری از شبکهٔ ترافیک شهری و حتی کل سامانهٔ ترافیکی شهر نیز وجود خواهد داشت.

همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، مدیریت ترافیک خودروها یکی از چالش‌های مهم در سامانه‌های حمل‌ونقل شهری است. چراغ راهنمایی ابزاری است که با اجرایی نمودن سیاست‌های کنترلی، کمک شایانی به حرکت خودروها می‌کند. تعیین مدت زمان هر یک از وضعیت‌های چراغ راهنمایی، می‌تواند اثرهای متفاوتی بر جریان آمدوشد خودروها و در نتیجه بر کل سامانهٔ ترافیک شهری داشته باشد. در این مقاله برای تعیین سناریوی کنترلی مناسب، رویکردی بر پایهٔ شبکه‌های پتری رنگین برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم چراغ راهنمایی یک سامانهٔ ترافیکی پیشنهاد شده است. با به‌کارگیری رویکرد پیشنهادی، چند تقاطع خیابانی از شهر بوشهر

مدل‌سازی شد. با استفاده از شبیه‌سازی، سناریوهای مختلف کنترلی روی مدل به اجرا درآمد و تأثیر هر سناریو بر عملکرد سامانهٔ ترافیکی ارزیابی شد. بر اساس یافته‌های شبیه‌سازی، یکی از سناریوهای کنترلی به‌عنوان بهترین سناریو انتخاب شد. افزون‌بر یافته‌های یادشده، این پژوهش توانایی رویکرد پیشنهادی را برای مدل‌سازی ترافیک شهری نشان می‌دهد. در بررسی فراگیر با استفاده از رویکرد پیشنهادی در این مقاله، بخشی از سامانهٔ ترافیکی شهر بوشهر مدل‌سازی و شبیه‌سازی شد.

این پژوهش رفتار خرد خودروها و تأثیر چراغ راهنمایی را در روانی جریان ترافیک بررسی کرده است، درحالی‌که تولبا و همکاران (۲۰۰۳) کارکرد سیستم ترافیک شهری را به‌طور کلی بررسی کردند، این پژوهش توانست تأثیر چراغ راهنمایی را در جریان ترافیک بررسی کند. لیست و ستین (۲۰۰۴) با استفاده از شبکهٔ پتری کلاسیک کنترل و ایمنی چراغ‌های راهنمایی یک چهارراه را مدل و تجزیه و تحلیل کردند. در مقایسه با آنان، پژوهش کنونی توانسته است عملکرد یکی از سیستم‌های ترافیکی بسیار پیچیده را با ابزاری توانمندتر بررسی کند و راهکارهایی برای بهبود آمدوشد خودروها پیشنهاد دهد. این پژوهش همانند پژوهش کیم و یئو (۲۰۱۶) از شبکهٔ پتری استفاده کرده است. درحالی‌که آنان با دیدگاه کلان بر ایمنی سامانهٔ ترافیک شهری تمرکز داشتند، پژوهش کنونی بر عملکرد خرد خودروها در بهره‌مندی از چهارراه و نیز چراغ راهنمایی تمرکز دارد. در مقایسه با مطالعهٔ ژو و همکارانش (۲۰۱۶)، این پژوهش رفتار پویای سیستم چهارراه را با استفاده از شبکهٔ پتری رنگین تجزیه و تحلیل کرد، درحالی‌که آنان از زنجیرهٔ مارکوف استفاده کردند؛ به این معنا که در مطالعهٔ ژو و همکارانش (۲۰۱۶) شرط مارکوفی بودن توزیع‌های احتمال، لازم است؛ اما در این پژوهش توزیع‌های احتمال محدودیت ندارند. این پژوهش شبکهٔ ترافیک شهری را بررسی کرد و توانست رویکرد پیشنهادی (سلیمی فرد و انصاری، ۱۳۹۰) را برای شبکهٔ ترافیک شهری به‌کار گیرد.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، افزون بر مدل‌سازی سیاست‌های کنترلی چراغ‌های راهنمایی، رویدادهایی مانند تصادف، راه‌بندان، دوربرگردان‌ها، تخلیه‌نشدن کامل خودروهای پشت چراغ، مجزا کردن نوع خال‌ها برای نوع خودرو، استفاده از استراتژی زمان‌های متغیر و پاسخگو برای چراغ راهنمایی و اشغال شدن یک یا چند باند از خیابان نیز به مدل افزوده شود و پیامدهای آنها بر سیستم ارزیابی و حساسیت مدل به هر یک از این رویدادها ارزیابی گردد. همچنین، پژوهشگران می‌توانند از روش‌های دیگر شبیه‌سازی و سایر نرم‌افزارهای شبکه‌های پتری برای مدل‌سازی سیستم استفاده کرده و کل شبکهٔ آمدوشد شهر را مدل‌سازی کنند.

References

Aghajani, H., Samadi Miarkolaei, H., Lotfi, H. (2014). A Simulation Approach to Assembly Line Improvement of Iran Heavy Diesel Company. *Industrial Management Journal*, 6(4), 635-664. (*in Persian*)

Ansari, M. (2011). *Modeling and Simulation of Urban Traffic Using Colored Petri Nets: Case of Bushehr*. Persian Gulf University, Bushehr, Iran. (*in Persian*)

Avineri, E. (2005). Soft Computing Applications In Traffic And Transport Systems: A Review. *Advances In Soft Computing,* (1), 17-25.

Azar, A., Haghifam, M., Alibabaei, N. (2008). Modeling and Optimization of Power Plants Load and Production Switching Reduction in Emergency Electricity Network. *Industrial Management Journal*, 1 (1), 3–30. (*in Persian*)

Azar, A., Saghalzadeh, S., Rajabzadeh, A. (2012). Fuzzy Simulation in Uncertainty Conditions. *Industrial Management Journal*, 4 (2), 1–20. (*in Persian*)

CPN. (2013). *CPN Tools Web site*. Retrieved from http://www.cpntools.org.

De Jong, G. & Daly, A. (2007). Uncertainty In Traffic Forecasts: Literature Review And New Results For The Netherlands. *Transportation,* 34(4), 375–395.

De Oliveira, L. & Camponogara, E. (2010). Multi-Agent Model Predictive Control Of Signaling Split In Urban Traffic Networks. *Transportation Research Part C*, 120–139.

Di Febbraro, A. & Sacco, N. (2002). On Applying Petri Nets To Determine Optimal Offsets For Coordinated Traffic Light Timing. *The IEEE 5th International Conference On Intelligent Transportation Systems.* Singapore. 10, 773-778.

dos Santos Soares, M., & Vrancken, J. (2008). Responsive traffic signals designed with petri nets. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, SMC 2008.* 1942-1947.

Dotoli, M., & Fanti, M. P. (2006). An urban traffic network model via coloured timed Petri nets. *Control Engineering Practice*, *14*(10), 1213-1229.

Farhi, N., Goursat, M. & Quadrat, J. (2009). Road Traffic Models Using Petri Nets And Minplus Algebra. *Traffic and Granular Flow '07, Part I,* 281-286.

Gil, J. (2015). Building a multimodal urban network model using openstreetmap data for the analysis of sustainable accessibility. In *OpenStreetMap in GIScience* (pp. 229-251). Springer International Publishing.

Helbing, D. (2002). Micro and Macro-Simulation of Freeway Traffic. *Mathematical And Computer Modelling,* 35(5-6), 517-547.

Hu, M., Jiang, R., Wang, R. & Wu, Q. (2009). Urban Traffic Simulated From The Dual Representation: Flow, Crisis and Congestion. *Physics Letters A,* 373(23-24), 2007-2011.

Huang, Y. S., Chung, T. H., & Lin, T. H. (2006). Design and analysis urban traffic lights using timed colour Petri nets. In *Proceedings of the International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC'06.* 248-253. IEEE.

Iordache, M. & Antsaklis, P. (2009). Petri Nets and Programming: A Survey. *Proceedings of the 2009 American Control Conference*, St. Louis, USA, 4994-4999.

Jensen, K. (1994). An Introduction To The Theoretical Aspects Of Coloured Petri Nets. *Lecture Notes In Computer Science,* 803, 230-272.

Kim, S. & Yeo, H. (2016). A Flow-based Vulnerability Measure for the Resilience of Urban Road Network. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 218, 13-23.

Li, J. & Li, Q. (2008). Modeling Of Urban Traffic System Based On Dynamic Stochastic Fluid Petri Net. *Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System,* Guangzhou, China*,* 8*,* 485-491.

Lin, L., Tang, N., Mu, X. & Shi, F. (2003). Implementation Of Traffic Lights Control Based On Petri Nets in Intelligent Transportation Systems. *IEEE Proceedings,* (2), 1087-1090.

List, G. & Cetin, M. (2004). Modeling Traffic Signal Control Using Petri Nets. *IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, 5*(3), 86-91.

López-Neri, E., Ramírez-Treviño, A. & López-Mellado, E. (2009). A Modeling Framework for Urban Traffic Systems Microscopic Simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(8), 1145-1161.

Pross, S. & Bachmann, B. (2009). A Petri Net Library for Modeling Hybrid Systems In Openmodelica. *Proceedings 7th Modelica Conference*, 454-462.

Rahman, S. & Ratrout, N. (2009). Review of the Fuzzy Logic Based Approach in Traffic Signal Control: Prospects in Saudi Arabia. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 9*(5), 58-70.

Sadeghimoghadam, A., Khatami Firoozabadi, A., Rabbani, Y. (2011). Using SD and SSM Mixed Approach for Unstructured Social Problems. *Industrial Management Journal*, 3 (7), 55–76. (*in Persian*)

Salimifard, K. & Ansari, M. (2013). Modeling and Simulation of Urban Traffic Signals. *International Journal of Modeling and Optimization*, 3(2), 172-175.

Salimifard, K., Ansari. M. (2012). Modeling and Simulation of Urban Traffic Using Colored Petri Nets. *Sanandaj IAU Journal of Industrial Management*, 7 (20), 77-90. (*in Persian*)

Smit, R., Ntziachristos, L. & Boulter, P. (2010). Validation of Road Vehicle And Traffic Emission Models – A Review. *Atmospheric Environment,* 44(25), 2943-2953.

Tian, Z., Jia, L., Dong, H., Su, F. & Zhang, Z. (2016). Analysis of Urban Road Traffic Network Based on Complex Network. *Procedia Engineering*, *137*, 537-546.

Tolba, C., Thomas, P., ElMoudni, A., & Lefebvre, D. (2003). Performances evaluation of the traffic control in a single crossroad by Petri nets. In *Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA'03. IEEE Conference* (Vol. 2), 157-160. IEEE.

Wang, H., List, G. F., & DiCesare, F. (1993). Modeling and evaluation of traffic signal control using timed Petri nets. In *Systems, Man and Cybernetics, 1993.'Systems Engineering in the Service of Humans', Conference Proceedings*, International Conference on (Vol. 2), 180-185. IEEE.

Wang, J., Jin, C. & Deng, Y. (1999). Performance Analysis Of Traffic Networks Based On Stochastic Timed Petri Net Models. *Fifth IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS '99)*, 77-85.

Yu Chou, C. & Chung, H. (2001). Application Of Computer Simulation To The Design Of A Traffic Signal Timer. *Computers & Industrial Engineering,* (39), 81-94.

Zhang, L. G., Li, Z. L., & Chen, Y. Z. (2008). Hybrid petri net modeling of traffic flow and signal control. In *Machine Learning and Cybernetics, 2008 International Conference on* (Vol. 4), 2304-2308. IEEE.

Zhang, Y. & Houli, D. (2007). Modeling Mixed Traffic Flow At Crosswalks In Micro-Simulations Using Cellular Automata. *Tsinghua Science and Technology, 12*(2), 214-222.

Zhu, G., Song, K., Zhang, P. & Wang, L. (2016). A Traffic Flow State transition Model for Urban Road Network Based on Hidden Markov Model. *Neurocomputing*, 214, 567–574.